DOI:10.11931/guihaia.gxzw201806025

缓释砂硒对绿甘蓝富硒作用及生长的影响

张化雨[1]，徐广平[2]，庞哲[3]，张立荣[4]，马丽霞[1*]

（1.北京市第一〇一中学，北京 100091；2.广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所，广西 桂林 541006；3.中国科学院大学，北京 100049； 4.中国科学院青藏高原研究所，北京 100101）

摘要：硒是人体必需的微量元素之一，在维持人体正常生理过程和提高人体免疫力方面发挥着重要的作用，人体缺硒会导致多种疾病。无机硒强化剂的人体吸收和利用不太理想，利用植物生长过程中吸收无机硒转化为有机硒则相对安全有效。砂硒因沙子具有透气保水的特性，同时硒释放相对缓慢，能提供稳定的硒来源，是比较理想的富硒蔬果培养基质。为了探讨缓释砂硒对绿甘蓝富硒作用和生长的影响，本研究设置对照组（CK）、实验组（缓释砂硒（CT）、鸡粪和砂硒 1:1 混合（CT1)、鸡粪和砂硒 1:2 混合（CT2) 和鸡粪（CT3））等 5 个处理。实验结果表明：CT、CT1 和 CT2 处理的绿甘蓝硒含量比 CK 分别增加 45%、61%和 64%，逐步回归分析表明绿甘蓝硒含量和土壤硒含量呈显著正相关（$P < 0.05$）；CT2 处理的效果最好，绿甘蓝的产量增加 45%，叶片厚度增加 22.78%，水分利用效率提高 56.66%。土壤锰含量和硒含量共同解释了绿甘蓝生物量变化的 72%，而土壤锌含量解释绿甘蓝水分利用效率变化的 66%。砂硒添加后，通过增加土壤硒含量提高绿甘蓝硒含量，砂硒和鸡粪配比更有效地提高了绿甘蓝硒含量并促进其生长。该研究结果为富硒绿甘蓝的生产提供了一个新思路。

关键词：缓释砂硒，绿甘蓝，锰和锌，土壤微生物，生物量

中图分类号： Q16　　　　文献标识码：A

Effect of slow-released sand selenium on the selenium enrichment and growth of green cabbage

---

基金项目：国家重点研究和发展方案项目(2016YFC0501802)；国家自然科学基金(31760162)；广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金项目(17-259-23)[Supported by the National Key R＆D Program of China(2016YFC0501802)；the National Natural Science Foundation of China (31760162)；the Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain(17-259-23)]。

作者简介：张化雨(2001－)，女，北京市人，关注生态环境研究，(E-mail) 1737239218@qq.com。本论文实验报告获得第 48 届日内瓦国际发明展金奖和第 38 届北京市科技创新大赛二等奖。

***通信作者**：马丽霞，北京市高级教师，关注环境生态学研究，(E-mail) teacherma101@ 126.com。

ZHANG Huayu[1], XU Guangping[2], PANG Zhe [3], ZHANG Lirong [4], MA Lixia [1*]

（1. *Beijing 101 Middle School*，Beijing 100091, China；2. *Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006, Guangxi, China；3. *University of Chinese Academy of Sciences*，Beijing 100049, China； 4. *Institute of Tibetan Plateau research, Chinese Academy of Sciences*，Beijing 100101, China）

Abstract：Selenium (Se) is an essential element for humans. Se deficiency can result in many diseases such as Keshan and Kashin-Beck diseases, and can cause immune deficiency and even cancer. However, most Se supplements in the market come from inorganic Se addition, which are unsafe and expensive. Natural Se sand is a readily available product which is air permeable and watertight. It is a kind of good matrix for producing Se enrichment plant. Green cabbage is a common vegetable that provides nutrition to human. This project aims to test the efficiency of Sand Se in cultivating green cabbage and provide Se as a nutrition source. Experiments include five group: a control group (CK) without fertilization, and four experimental groups: CT: natural Sand Se, CT1: chicken manure: Sand Se =1:1, CT2: chicken manure: Sand Se =1:2, CT3: chicken manure. Results showed that Sand Se addition increased significantly Se concentration of green cabbage by 45%、61% and 64%. Compared with the CK and CT3 group, the yield, leaf thickness and water use efficiency of the green cabbage increased significantly by 45%, 22.78% and 56.66%, respectively, under chicken manure: Se sand =1:2 treatment. Soil manganese and zinc concentration accounted for 72% variation of the green cabbage biomass and soil zinc accounted for 66% variation of the water use efficiency. These results also indicated that sand Se, particularly when mixed with chicken manure, can not only provide Se as a nutrition but also is beneficial to green cabbage yield. This study results provide useful information for supplying economic and healthy Se green cabbage.

Key words：slow release Se sand, green cabbage, Mn and Zn, soil microbe, biomass

硒是人体必需的微量元素之一，在维持人体正常生理过程和提高人体免疫力方面发挥着重要的作用 (曾静和罗海吉，2003；姜超强等，2015；梁若玉等，2017；王磊等，2017)。人体缺硒会导致多种疾病，如克山病和大骨节病，甚至癌症等（郭亚南等，2017）。人体可吸收的硒包括无机硒（硒酸钠和亚硒酸钠）和有机硒。目前发现无机硒强化剂的吸收和利用很不理想，其生物有效性低，毒性较大，更严重的是无机硒中毒量与需要量之间范围小，因而被严格限制其使用量（刘华山，2009；曾庆良等，2018）。利用植物生长过程中吸收无机硒转化为有机硒相对安全（果秀敏等，2003；周鑫斌等，2017）。这一方法目前多用根施硒肥或者叶面喷施无机硒来实现（王宁宁等，1994； 张弛等，2001；刘华山，2009），但这些措施不仅提高了生产成本，而且还存在潜在的环境风险，很难获得硒含量稳定的产品（张联合等，2006；周鑫斌等，2017）。

砂硒因其具有透气保水的特性，同时硒释放相对缓慢，能提供稳定且含量保证的硒，所以是比较理想的富硒蔬果的良好培养基质。但砂硒栽培蔬菜富硒效果如何目前还不十分清楚。绿甘蓝是日常非常普遍的蔬菜，富含维生素 C，营养价值高，适合做为日常食补蔬菜。如何用天然富硒基质培育出人们日常食用且硒含量稳定的富硒蔬菜成为近年来硒产品开发的热点。因此，我们提出以下科学问题：1）砂硒添加是否能提高绿甘蓝硒含量和产量？2）砂硒添加影响绿甘蓝硒含量和产量的因素是什么？这两个问题的解决能够揭示缓释砂硒对绿甘蓝富硒作用和生长的影响，可为富硒绿甘蓝的生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验样地和实验设计

该实验于 2017 年 4 月 10 日在北京市 101 中学温室内的生态试验田开展。在试验田内空旷平坦的种植场地，随机选取 5 块样地，设置宽 50 cm，行距 30 cm，长 10 m 的区域，每块区域随机移栽育好苗的绿甘蓝，间距 30 cm。 共 5 个处理，各 3 个重复，分别为对照组 CK、实验组 CT、实验组 CT1、实验组 CT2 和实验组 CT3。使用砂硒及有机肥鸡粪量见表 1。

表 1 实验设计

Table 1 Experimental design

分组 Groups	处理 Treatment	简写 Acronym	施肥量 Fertilizing amount (kg)
对照组 Control group	空白对照 Control	CK	0
实验组 Treatment group	砂硒 Sand Se	CT	1
	鸡粪：砂硒= 1:1 Chicken manure: Sand Se	CT1	0.325:0.325
	鸡粪：砂硒= 1:2 Chicken manure: Sand Se	CT2	0.25:0.5
	鸡粪 Chicken manure	CT3	0.5

1.2 实验材料

土壤：选用北京市第 101 中学生态园内土壤，pH 值 7.5，硒含量 0.14 mg $\cdot$kg^{-1}。鸡粪肥：生产商为河北高碑店市华舟有机肥制造有限公司，硒含量 0.17 mg $\cdot$kg^{-1}；缓释砂硒：硒含量 0.5 mg $\cdot$ kg^{-1}，北京仁创科技有限公司提供，来自于内蒙古奈曼旗的富硒砂，扫描电镜显示其外部（图 1 左）及内部（图 1 右）具有透气保水的结构（图 1）。

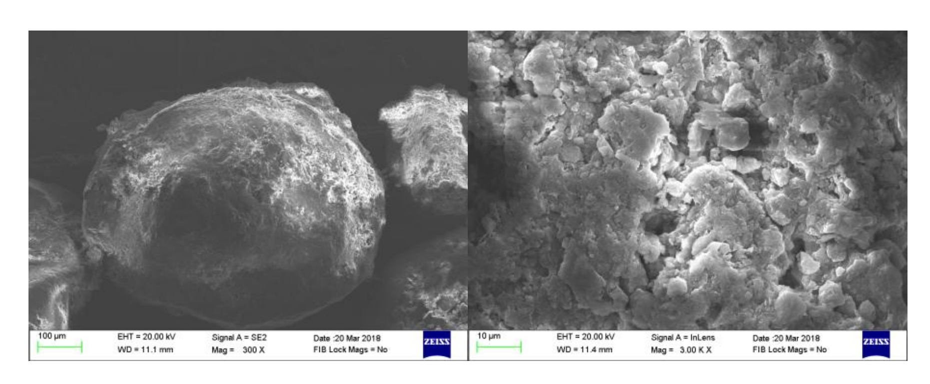


图 1 砂硒外部（左） 和内部（右）结构扫描图（场发射扫描电镜）

Fig. 1 Outside (left) and inside (right) structure of Se sand (Field emission scanning electron microscope)

1.3 实验过程

1.3.1 催芽

2017 年 4 月 20 日选取 170 粒饱满的绿甘蓝种子，并在催芽前进行温水浸种消毒。待水温降至到室温，并等到种子吸水饱满后取出种子，将准备好的培养皿上放上一张厚度适当的纸巾，纸巾打湿并控掉多余的水分，并在上面放上消过毒的种子，将其放在培养箱中 25~26 ℃进行催芽。在催芽过程中，保持纸巾和芽的湿润，两天左右观察到芽有白根露出即可。

1.3.2 播种和育苗

2017 年 4 月 25 日将催过芽的种子播种在小花盆中，当 4~5 片真叶长出时挑选大小基本相等的幼苗进行移栽。

1.3.3 土壤理化性质测定

每个处理取 50 g 土样，风干后送到北京市农科院测定土壤理化性质。利用水:土=1:5 测定土壤 pH，利用凯氏定氮法测定土壤全氮含量。用比色法测定土壤速效磷含量。用火焰光度计法测定土壤全钾。根据 DTPA（一种螯合剂）浸提法，用原子吸收分光光度计，以乙炔-空气火焰测定浸提液中速效锌、锰、铁的含量。另一部分样品送至中国农科院检测中心测定硒含量，选取环保部发布的硒测定标准，采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定样品中的总硒含量。利用环刀法测定土壤容重和含水量。土壤微生物数量的测定按照《土壤微生物分析方法手册》（许光辉和郑洪元，1986）进行，利用牛肉膏蛋白胨培养基和高氏 1 号培养基培养土壤细菌和放线菌。具体在 7 月 25 日取植株根系附近的土壤，每组分别称取 1g 土样，加入 9 mL 无菌蒸馏水，搅拌均匀后静置 15 分钟，使用移液器取上层清液 1ml 进行梯度稀释，分别稀释为 10^{-1} 至 10^{-7}，使用血球计数板在显微镜下进行观察，挑选适合浓度。最终决定接种 10^{-2}，10^{-3}，10^{-4} 进行放线菌的培养观察，接种 10^{-5}，10^{-6}，10^{-7} 进行细菌的培养观察。

稀释后将稀释液分别接种到配好的培养基中，其中细菌培养基包括牛肉膏 3.0 g、蛋白胨 10.0 g、NaCl 5.0 g 、琼脂 15 g、水 1 000 mL，pH 7.4~7.6；放线菌培养基包括 KNO_3 0.1 g、K_2HPO_4 0.05 g、$MgSO_4\cdot 7H_2O$ 0.05 g、NaCl 0.05 g、$FeSO_4\cdot 7H_2O$ 0.001 g。接种完毕后放入恒温培养箱进行培养，细菌采取 30 ℃避光恒温培养，放线菌采取 28 ℃避光恒温培养，定期观察培养基上的菌落个数和大小并进行记录。

1.3.4 绿甘蓝指标测定

绿甘蓝叶片的测定：在苗期，利用直尺测量绿甘蓝的叶长和叶宽，定期数叶片数并观察叶片颜色；在绿甘蓝移栽成活后，通过直尺测定每片叶子的叶长和叶宽用来计算出叶面积；选取绿甘蓝最大的叶子，利用游标卡尺测量叶片厚度；选择晴朗的天气，在九点至十一点，光饱和光强下（1 000 umol • m^{-2} • s^{-1}），用美国 Ciras-III型便携式光合仪，测定绿甘蓝光合速率（Pn），蒸腾速率(E)，气孔导度（Gs），水分利用效率=光合速率（Pn）/蒸腾速率（E）；绿甘蓝叶绿素含量的测定：取绿甘蓝成熟叶，擦净表面的污物，并在叶子上打孔，称量选取的叶子的重量为 0.2 g，再用配置好 80%的丙酮溶液（分析纯，北京化工厂生产，含量≥99.5°）浸提 1-2 天直至叶子变白后开始进行下一步的实验。用 80%的丙酮溶液和蒸馏水各洗三遍比色皿后将浸提液倒入其中用 UV-1 700c（编号：MC150703001，生产商：上海美析仪器有限公司）型紫外可见分光光度计进行测量，在 646、663、470 mm 分别测量其吸光度，之后根据公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量，其计算公式分别为：Ca= 12.21A663–2.81A646，Cb= 20.13A646–5.03A663，CT = Ca+ Cb = 17.32A646–7.18A663，Cx.c =(1 000A470 –3.27 Ca – 104 Cb)/229。

绿甘蓝紧实度测定：绿甘蓝包叶后利用直尺定期测定绿甘蓝包叶直径。生物量测定：在绿甘蓝成熟后，将整株挖起，冲洗干净，将冲洗干净的地上和地下部分用吸水纸吸干，先称鲜重，后在 105 ℃下杀青 30 min，然后调至 65 ℃，烘干至恒重，分别称取地上和地下部分的干重，最后根据称量的数据计算生物量和根冠比。叶片横切面液泡大小和细胞数量的测定：取测过叶片厚度的成熟绿甘蓝叶片，在贴近叶脉右侧距离叶基 2cm 处剪 0.5 cm 宽 1 cm 长的叶片放入固定液中（正丁醇：国药集团化学试剂有限公司 10005218；无水乙醇：国药集团化学试剂有限公司 100092683；番红固绿(植物)染液：武汉谷歌生物科技有限公司 G103；中性树胶国药集团化学试剂有限公司 10004160），在中国科学院青藏高原研究所做成石蜡切片。把做好的切片放进组织切片扫描仪（型号：Pannoramic MIDI，厂家：3D HISTECH，匈牙利），仪器自动对焦开始扫描。在 10X 图片中截取相同面积，数细胞数量，并测量液泡最大和最小直径。每个处理做 4 个重复，共 20 个图片。

1.4 数据分析

数据处理及图表绘制运用 Excel 2007 软件，描述性统计分析运用 SPSS18.0 软件，采用单因子（One-way ANOVA）进行方差分析，选择 Tukey 多重比较检验处理对被测定的指标的差异，以 $P < 0.05$ 作为差异显著的标准。利用逐步回归的方法，分析测定的土壤理化性质对绿甘蓝硒含量、生物量、蒸腾速率和叶片厚度等的影响。

2 结果与分析

2.1 砂硒对绿甘蓝的影响

从表 2 可以看出，缓释砂硒各处理导致了部分土壤和植物指标发生显著变化（表 2），显著改变了土壤硒含量、微生物菌落数、容重、速效磷、速效铁、速效锰和锌、绿甘蓝硒含量、生物量、叶片厚度、蒸腾速率、水分利用效率和光合色素浓度。

表 2 砂硒对土壤和植物指标的影响

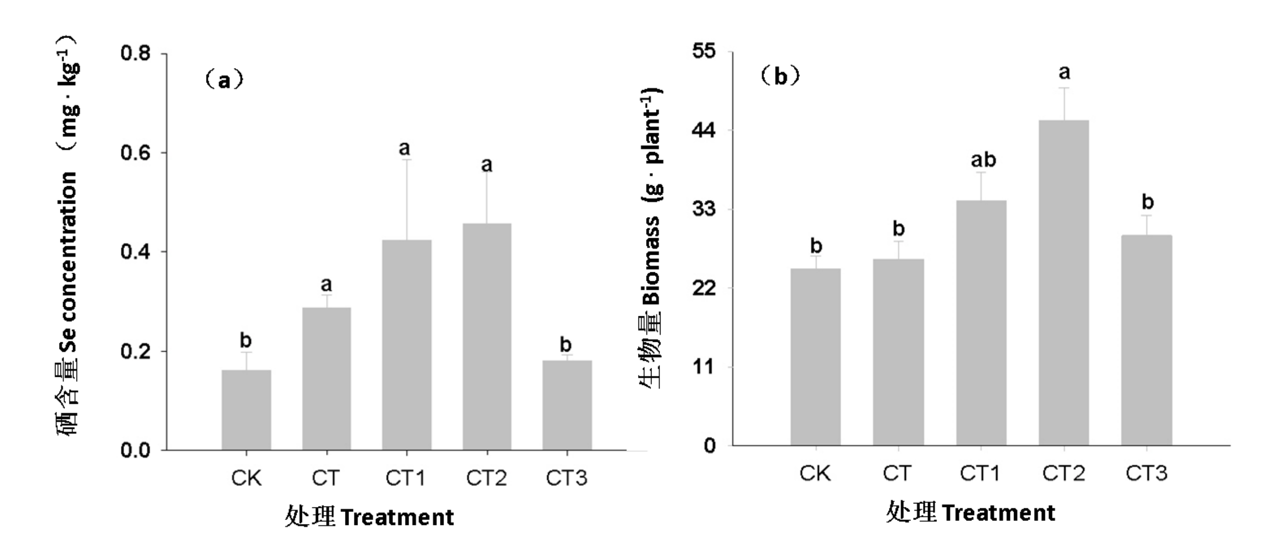
Table 2 Effect of treatment on green cabbage and soil properties

测定指标	*df*	*F*	*P*
绿甘蓝硒含量(mg kg $^{-1}$)	4	20.08	0.000
绿甘蓝地上生物量（g）	4	4.75	0.005
绿甘蓝叶片厚度(cm)	4	8.47	0.000
绿甘蓝蒸腾速率(mol m $^{-2}$ s $^{-1}$)	4	13.05	0.000
绿甘蓝水分利用率（g kg $^{-1}$）	4	4.32	0.007
绿甘蓝叶绿素 a 浓度(mg L $^{-1}$)	4	3.00	0.003
绿甘蓝叶绿素 b 浓度(mg L $^{-1}$)	4	4.00	0.010
绿甘蓝类胡萝卜素浓度(mg L $^{-1}$)	4	4.00	0.015
土壤硒含量(mg kg $^{-1}$)	4	41.05	0.000
土壤微生物菌落数（个）	4	5.36	0.010
土壤容重（g cm $^{-3}$）	4	9.21	0.001
土壤速效磷含量(mg kg $^{-1}$)	4	4.32	0.020
土壤速效铁含量（mg kg $^{-1}$）	4	5.30	0.010
土壤速效锰含量（mg kg $^{-1}$）	4	5.31	0.020
土壤速效锌含量（mg kg $^{-1}$）	4	4.41	0.020

注：表中只显示影响显著的结果。

Note: Only significant results are shown in the table.

与 CK 相比，CT、 CT1 和 CT2 分别显著地提高了绿甘蓝叶片硒含量的 45%、61%和 64%(图 2：a)。逐步回归分析显示绿甘蓝硒含量主要是由土壤硒含量决定的（表 3）。结果表明添加砂硒，同时添加鸡粪肥更有利于绿甘蓝硒的硒累积，与 CK 相比，CT2 显著增加了绿甘蓝生物量（图 2：b）。



注：**CK**. 无添加；**CT**. 砂硒肥；**CT1**. 鸡肥：砂硒 1:1；**CT2**. 鸡肥：砂硒 1:2；**CT3**. 鸡肥。小写字母不同表示差异显著（$P < 0.05$）。下同。

Note: **CK**. Blank; **CT**. Se sand; **CT1**. Chicken manure: Se sand. 1:1; **CT2**. Chicken manure: Se sand 1:2; **CT3**. Chicken manure. Different letters indicate significant differences ($P<0.05$). Data shown are mean ± SE. The same below.

图 2 绿甘蓝硒含量（**a**）和生物量（**b**）的影响

Fig. 2 Se concentration (**a**) and biomass of green cabbage (**b**)

表 3 绿甘蓝硒含量、生物量和蒸腾速率的影响因子

Table 3 Effect factors of Se concentration, biomass and transpiration rate of green cabbage

绿甘蓝指标 Trait of green cabbage	变量 Variable	r^2	F	*P*
绿甘蓝硒含量 Se concentration of green cabbage	土壤硒含量 Soil Se concentration	0.65	18.37	0.001
	土壤锰含量 Soil Mn concentration	0.13	5.21	0.048
绿甘蓝生物量 Biomass of green cabbage	土壤硒含量 Soil Se concentration	0.2	6.63	0.03
	土壤锰含量 Soil Mn concentration	0.52	10.7	0.008
绿甘蓝蒸腾速率 Transpiration rate of green cabbage	土壤锌含量 Soil Zn concentration	0.66	13.68	0.007

与 CK 相比，CT2 显著降低植物叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量（图 3：a，b，c）。实验结果表明砂硒或砂硒混合鸡粪肥都不同程度地改变了植物的叶片厚度，其中 CT2 显著增加叶片厚度的 22.78%（图 3d）。从植物的形态指标上看，施鸡粪肥并没有显著改变绿甘

蓝的叶面积和叶厚度（$P > 0.05$），但砂硒显著改变了绿甘蓝的叶片厚度。利用逐步回归的方法，未发现所测定的土壤理化性质对甘蓝叶片厚度有直接的影响（$P > 0.05$）。叶片横切扫描结果显示，与 CK 相比，CT，CT1，CT2 和 CT3 均显著提高绿甘蓝叶片单位面积内液泡大小，但是只有砂硒与鸡粪混合和单独添加鸡粪时绿甘蓝细胞数量才显著增加（表 4）。

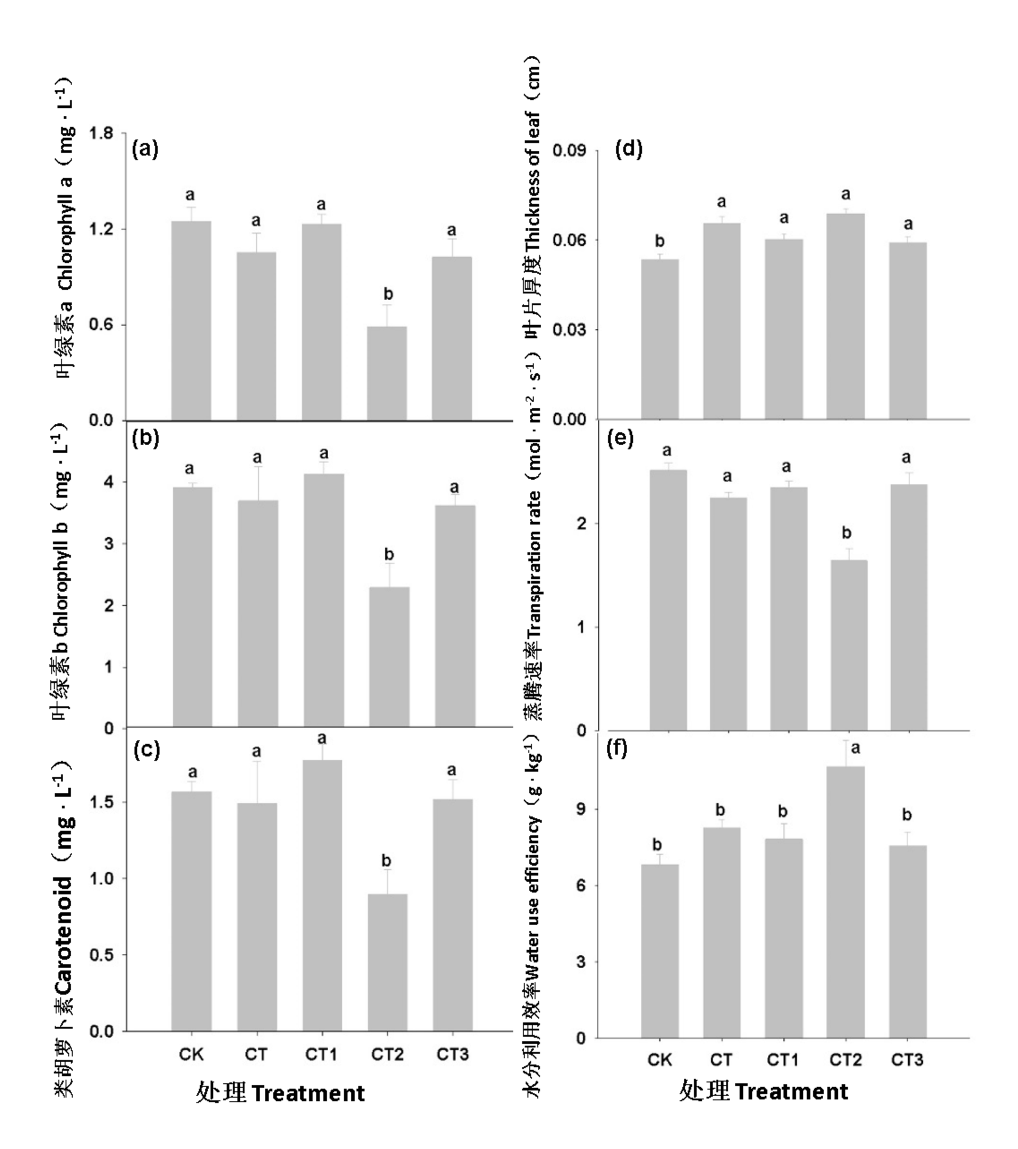


图 3 绿甘蓝叶绿素 a（**a**）、叶绿素 b（**b**）和类胡萝卜素含量（**c**）、叶片厚度（**d**）、蒸腾速率（**e**）和水分利用效率（**f**）

Fig. 3 Photosynthetic pigments concentration (**a**), leaf thickness (**b**), transpiration rate (**c**) and water use efficiency

通过测定绿甘蓝的气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率，结果显示 CT2 显著降低了绿甘蓝叶片蒸腾速率的 34.74%，而提高了水分利用效率的 56.66%（图 2c 和图 2d）。逐步回归分析结果表明土壤锌含量解释了绿甘蓝蒸腾速率变化的 66%（表 3）。

表 4 叶片横切液泡大小和细胞数量

Table 4 Size of vacuole and amount of green cabbage cell

处理 Treatment	液泡大小（μm,10x） Vacuole size	细胞（个） Cell amount
CK	200.3±42.7c	38±20b
CT	402.5±61b	61±10ab
CT1	504±57ab	96±15ab
CT2	784.4±37a	135±12a
CT3	215.9±30c	96±16ab

注：小写字母不同表示差异显著（$P < 0.05$）。

Note：Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

2.2 砂硒对土壤的影响

与对 CK 相比，施砂硒、施鸡粪混合砂硒 1:1 和 1:2 分别提高绿甘蓝硒含量的 45%、61% 和 64%（图 4：a）。说明砂硒添加起到增加土壤硒含量的作用。与 CK 相比，砂硒添加不同程度上降低了土壤容重。这是因为砂硒具有保水透气特性，所以砂硒添加降低了土壤紧实度和土壤容重，增加了土壤的孔隙度。实验各处理均对土壤含水量没有显著影响（$P > 0.05$）。

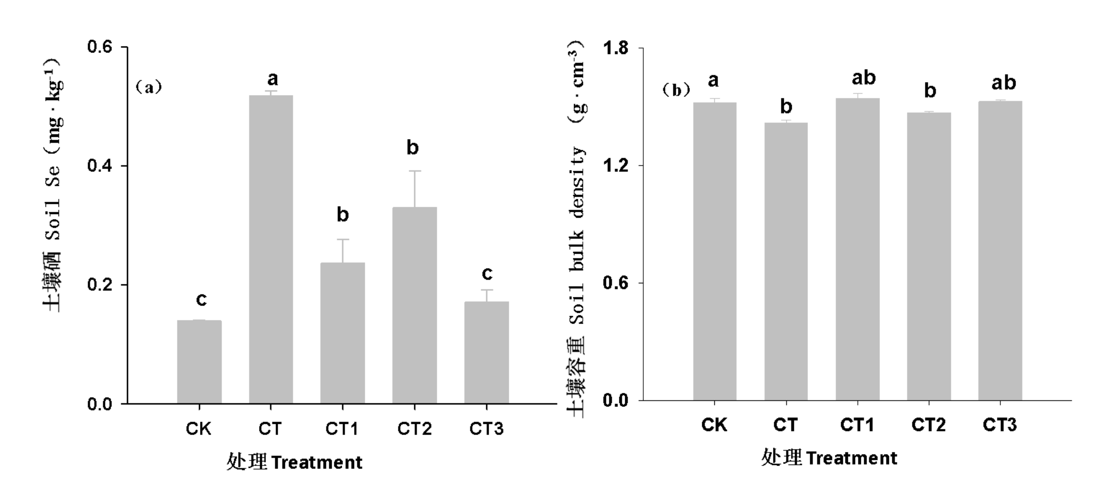


图 4 土壤硒含量（**a**）和土壤容重（**b**）的影响

Fig. 4Soil Se concentration **(a)** and bulk density **(b)**

与 CK、CT 和 CT1 相比，CT2 和 CT3 均显著提高土壤速效铁、速效磷和锌的含量，CT2 与 CK 相比有效铁含量提高了 58.97%、速效磷提高了 20.91%，有效锌含量提高了 16%。这表明鸡粪添加和砂硒添加都有可能增加土壤有效铁、速效磷和速效锌的含量（图 5：a，b，c）。与 CK 相比，CT2 土壤速效锰含量显著增加，表明砂硒和鸡粪混合添加是促进土壤速效锰增加的主要原因。相对于与 CK，CT、CT1、CT2 和 CT3 都提高了土壤微生物的菌落数（图 6），其中 CT 和 CT2 提高的最多。该实验结果表明单位面积内砂硒越多土壤微生物菌落数越多，这可能与砂硒比较好的透气保水性有关。

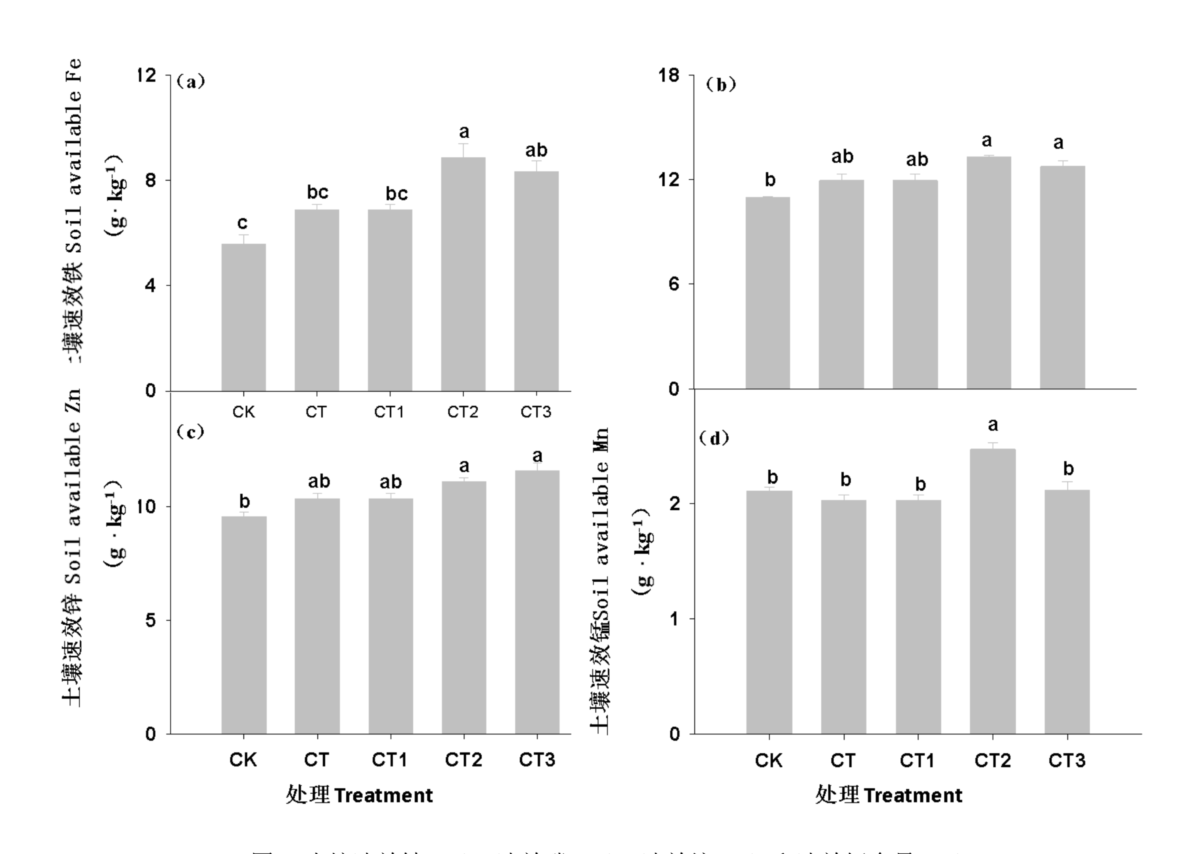


图 5 土壤速效铁（**a**）、速效磷（**b**）、速效锌（**c**）和速效锰含量（**d**）

Fig. 5 Soil available iron (**a**), available phosphorus (**b**), available Zink (**c**) and available manganese (**d**) concentration

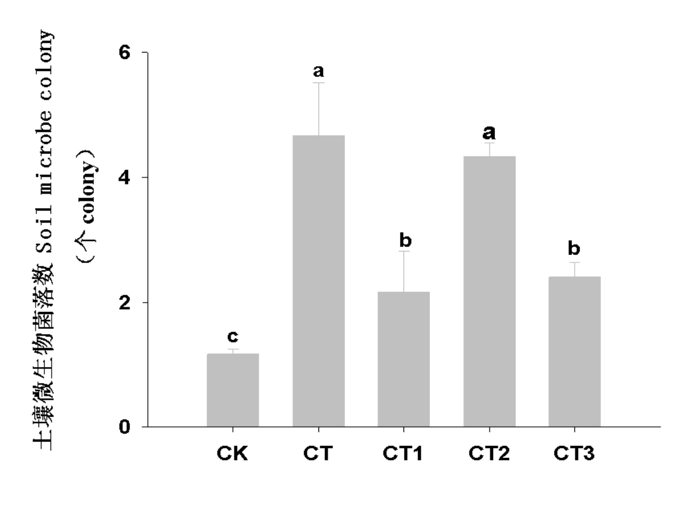


图 6 土壤微生物菌落数

Fig. 6 Soil microbial colonies

3 讨论与结论

3.1 砂硒对绿甘蓝硒含量和地上生物量的影响

我们的实验结果表明添加砂硒能够提高绿甘蓝硒含量，但同时添加鸡粪肥则更有利于绿甘蓝硒的累积。很多硒酸钠或亚硒酸钠直接添加的实验结果也都表现出无机硒添加提高了植

物的硒含量（罗永尧等，1998；刘海燕，2015）。但这些研究也同时发现稍高含量的无机硒添加就会对植物有毒害作用，降低植物生物量，甚至导致植物死亡（罗永尧等，1998；刘海燕，2015）。例如罗永尧等（1998）发现仅仅培养 1 天即可见 0.5 mg • kg^{-1} 硒处理的水稻幼苗叶缘卷曲，1.0 mg •kg^{-1} 硒以上的处理则幼苗接近死亡。在我们的实验中，CT（0.52 mg •kg^{-1} 硒）、CT1（0.25 mg • kg^{-1} 硒）和单纯鸡粪添加均没有影响绿甘蓝的地上生物量，而砂硒和鸡粪混合 2:1 却显著升高绿甘蓝生物量。表明砂硒与鸡粪 2:1 能有效提高绿甘蓝的产量。张弛等发现适量的硒添加油菜根系氧化还原能力和蛋白质含量提高而过氧化物丙二醛的含量降低，显著地促进油菜生长发育、维持旺盛的生长活力、增强抗逆性、提高植物硒含量和促进油菜增产（张弛等， 2002）。我们的逐步回归分析结果显示土壤硒含量和锰含量解释绿甘蓝生物量变化的 72%，这可能是因为锰是植物光合作用必须的元素，硒是植物新陈代谢必须元素，因此硒添加可能通过促进绿甘蓝新陈代谢或者通过提高土壤锰含量从而促进光合作用，间接提高绿甘蓝生物量（Chen et al，2018）。

人体可摄入的硒包括无机硒（硒酸钠和亚硒酸钠）和有机硒。从 2000 年开始国际上已禁用无机硒。酵母硒、麦芽硒、纳米硒人体吸收和代谢率低，人体吸收率仅 40%~60%，且剩余为无机硒残留（王俊等，2003）。目前备受青睐的为天然有机植物活性硒，即从富硒土壤中吸收硒元素的食品，经过生长过程中的光合作用和体内生物转化作用，在体内以硒代氨基酸形态存在，人体吸收率达 99%以上，既满足了人体硒元素需要（刘新伟等，2015），又解决了硒的吸收和代谢率偏低难题。因此，真正的富硒食品应该是富硒土壤中栽培生产出的有机硒，并且通过土壤-植物-(动物)-人的食物链方式补硒是安全有效的途径（王俊等，2003）。

3.2 砂硒对绿甘蓝形态指标的影响

本实验结果显示单纯砂硒添加降低绿甘蓝光合色素含量。这一结果与硒添加对油菜和小麦叶绿素的影响相反。王宁宁等（1994）和张弛等（2002）发现种植小麦添加亚硒酸钠或栽培油菜添加亚硒酸钠均导致植物叶片光合色素含量升高。但刘华山（2009）的研究结果认为不同水平的亚硒酸钠添加对叶绿素降低的影响是暂时的，一般可能最初叶绿素含量略有下降，但是随着生长的继续进行，各处理水平叶绿素含量会趋于同一值。我们的实验结果部分解释了为什么单纯砂硒添加并没有提高绿甘蓝生物量。在我们的实验砂硒混合鸡粪 2:1 有助于绿甘蓝叶片厚度增加。普遍认为植物叶片的厚度是由于叶片细胞本身的生长以及植物体内的水分含量引起的。植物水分充足时，植物叶片变厚，缺水时则叶片变薄（陆元洲等，2015）。我们实验结果并没有发现施鸡粪或砂硒影响土壤含水量，也未发现所测定的土壤理化性质对绿甘蓝叶片厚度有直接的影响。叶片横切扫描结果显示砂硒添加显著提高绿甘蓝叶片单位面

积内液泡大小，但是只有砂硒配比鸡粪和单独添加鸡粪时绿甘蓝细胞数量才显著增加。因此，本实验绿甘蓝叶片厚度的增加是因为细胞大小和细胞数量增加导致的（Hunder et al，1981；Lindorf，1994）。

实验结果表明砂硒混合鸡粪 2:1 降低了绿甘蓝蒸腾速率并能有效提高叶片水分利用效率。魏孝荣等 （2005）发现锌添加能够显著提高玉米叶片蒸腾速率高达 36%，而洋甘蓝和花椰菜缺锌都降低了其蒸腾速率（张福锁，1995）。锌在植物气孔开闭中作用机理可能在于碳酸酐酶中含有锌，而碳酸酐酶能够调节 CO_2 的供应（张福锁，1995）。增加锌能够提高植物体内该酶的活性，有利于增加保卫细胞内的 HCO_3^-含量，促进气孔开放。但我们的结果显示 CT2 土壤锌含量最高却蒸腾速率最低，这表明在水分条件不缺，土壤锌充足时还有其他机制调控着植物的蒸腾速率以此来确保植物有较高的水分利用效率（张福锁，1995）。

总之，缓释砂硒添加（砂硒，鸡粪肥:砂硒 1:1，鸡粪肥:砂硒 1:2）使绿甘蓝的硒含量分别增加了 45%、61%和 64%，绿甘蓝硒含量和土壤硒含量显著地正相关（P< 0.05）；添加缓释砂硒后，降低了土壤容重，增加了土壤微生物菌落数量，提高土壤硒含量，改善土壤理化性质，进而提高绿甘蓝硒含量，尤其砂硒和鸡粪肥配比更有效地提高绿甘蓝硒含量并促进其生长。该实验结果表明砂硒添加不仅提高绿甘蓝硒含量，而且可以改善土壤条件，进一步促进绿甘蓝产量的提高，值得在农业上大面积推广。

参考文献：

CHEN F, SHEN J, MIN D, et al, 2018. Male Populus cathayana than female shows higher photosynthesis and less cellular injury through ABA-induced manganese transporting inhibition under high manganese condition[J]. Trees, 32(1): 255-263.

GUO XM, NIU JF, FANG Z, et al, 2003. On the forms of selenium in plant and mechanisms of physiological role of selenium[J].J Agric Univ Hebei , 26(S1):142-147. [果秀敏，牛君方，方正，等，2003. 植物中硒的形态及其生理作用[J]. 河业农业大学学报，26(S1):142-147.]

GUO Y, 2012. Geochemistry of selenium in Enshi area and experimental study of selenium-enriched crop cultivation [D]. Beijing: China University of Geosciences. [郭宇，2012. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]. 北京：中国地质大学.]

GUO YN, LI HR, YANG LS, et al, 2017. The relationship between environment selenium characteristic and distribution of Kaschin-Beck disease in the Yarlung Zangbo River bank [J]. Chin J Endemiol, 36(7):494-497. [郭亚南，李海蓉，杨林生，等，2017. 雅鲁藏布江两岸环境硒分布特征及与大骨节病发病的关系[J]. 中华地方病学杂志，36(7):494-497.]

HUNDER NPA, PALTA JP, Li PH, et al, 1981. Anatomical changes in leaves of Puma rye in response to growth at cold-hardening temperature[J]. Bot Gaz,142:55-62.

JIANG CQ, SHEN J, ZU CL, 2015. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soils [J]. Chin J Appl Ecol, 26(6): 809-816. [姜超强，沈嘉，祖朝龙，2015. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. 应用生态学报，26(6): 809-816.]

LI HR, YANG LS, TAN JA, et al, 2017. Progress on selenium deficiency in geographical environment and its health impacts in China[J]. Curr Biotechnol, 7(5):381-386.[李海蓉，杨林生，谭见安，等，2017. 我国地理环境硒缺乏与健康研究进展[J]. 生物技术进展, 7(5):381-386.]
LIANG RY, HE J, SHI YJ, et al, 2017. Bioavailability and profile distribution of selenium in soils of typical Se-enriched agricultural base[J]. Environ Chem, 36(7) : 1588-1595. [梁若玉，和娇，史雅娟，等，2017. 典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性与剖面分布分析[J]. 环境化学，36(7): 1588-1595.]
LINDORF H, 1994. Ecoanatomical wood features of species from a very dry tropical forest [J]. IAWA J, 15:45-61.
LIU HS, 2009. The effects of selenium on tomato and lettuces and the characteristics of selenium accumulation [D]. Yangzhou: Yangzhou University. [刘华山，2009. 番茄和生菜的施硒效应和积硒特性[D]. 扬州：扬州大学.]
LIU HY, 2015. Effects of different concentrations of trace elements on growth and quality of pea sprouts[D]. Hefei:Anhui Agricultural University. 刘海燕, 2015. [不同浓度的微量元素对豌豆芽苗菜的生长和营养品质的影响[D]. 合肥：安徽农业大学.]
LIU XW, WANG QL, DUAN BH, et al, 2015. Effects of selenite addition on selenium absorption，root morphology and physiological characteristics of rape seedlings[J]. Chin J Appl Ecol, 26(7): 2050-2056.[刘新伟，王巧兰，段碧辉，等，2015. 亚硒酸盐对油菜幼苗硒吸收、根系形态及生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 26(7): 2050-2056.]
LU YZ, JIANG ZH, LI X, et al, 2015. The review of plant moisture content detection[J]. Chin Agric Sci Bull, 31(9):168-177.[陆元洲，江朝晖，李想，等，2015. 植物水分含量检测综述[J]. 中国农学通报，31(9):168-177.]
LUO LG, TIAN C, LIU CH, et al. 2010. Effects of Se-nutrients on yield and Se-content of super rice [J]. Hunan Agric Sci, 2010(3A): 70-72. [罗连光，田昌，刘朝晖，等. 富硒植物营养素对超级稻产量及稻米硒含量的影响初探[J]. 湖南农业科学，2010(3A): 70-72.]
SONG JL, LI DS, 2009. Comparative anatomy analysis of the leaf thickness changes in tomato[J]. Acta Agric Zhejiang, 21(6): 590-592. [宋军兰，李东升，2009. 番茄叶片厚度变化规律的比较解剖分析[J]. 浙江农业学报，21(6) : 590-592.]
TAN JA, ZHU WY, 1991. The relationship between keshan disease and environmental selenium and other life elements[J]. Chin J Endemiol, 10(5):269-274. [谭见安，朱文郁，1991. 克山病与环境硒等生命元素的关系[J]. 中国地方病学杂志, 10(5):269-274.]
WANG J, HUANG M, XU XL, et al, 2003. Research progress of selenium and selenium rich functional food[J]. Jiangsu Agric Sci, 2: 53-56.[王俊，黄明，徐幸莲，等，2003. 硒及富硒功能食品研究进展[J]. 江苏农业科学，2: 53-56.]
WANG NN, DU XG, ZHU LJ. 1994. The effect of selenite on chlorophyll biosynthesis and some antioxdation in greening wheat leaves[J]. Acta Sci Nat Univ Nankai. [王宁宁，杜晓光，朱亮基，1994. 亚硒酸钠对转绿小麦叶片内叶绿素生物合成和某些抗氧化作用的影响[J]. 南开大学学报(自然科学版).]
WANG L, YANG JH, 2017. The selenium status and infactors affecting cultivation of selenium enriched tea in main tea garden of Guangxi [J]. J Anhui Agric Sci, 45(6) : 37-38. [王磊，阳继辉，2017. 广西主产茶园富硒现状及影响富硒茶栽培的因素[J]. 安徽农业科学，45(6):37-38.]
WEI XR, HAO MD, ZHANG CX, et al, 2005. Effects of zinc and manganese fertilizers on maize

photosynthetic performance under soil drought condition[J]. Acta Agron Sin, 31(8):1101-1104. [魏孝荣，郝明德，张春霞，等，2005. 土壤干旱条件下外源锌、锰对夏玉米光合特性的影响[J]. 作物学报, 31(8):1101-1104.]

WU YY, LUO ZM, PENG ZK, 1998. Research on the influence of selenium provided at different levels upon the growth of rice and its accumulation of selenium [J]. J Hunan Agric Univ, 24(3):176-179.[吴永尧，罗泽民，彭振坤，1998. 不同供硒水平对水稻生长的影响及水稻对硒的富集作用[J]. 湖南农业大学学报, 24(3):176-179.]

XU GH, ZHEN HY, 1986. Handbook of analytical methods for soil microbiology[M]. Beijing: Agriculture Press: 102-110. [许光辉，郑洪元，1986. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京：农业出版社: 102-110.]

YU J, LI LL, XIAO X, et al, 2017. Summary of research progress in plant selenium rich cultivation[J]. Hubei Agric Sci, 56(16):3017-3021.[余洁，李琳玲，肖贤，等，2017. 植物富硒栽培研究进展综述[J]. 湖北农业科学，56(16):3017-3021.]

ZHANG C, WU YY, PENG ZK, et al, 2002. Influence of selenium on the content of chloroplast pigment in rape seedlings[J]. J Hubei Inst Nat (Nat Sci Ed), 20(3):63-65. [张驰，吴永尧，彭振坤，等，2002. 硒对油菜苗期叶片色素的影响研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版)，20(3):63-65.]

ZHANG FS, 1991. Effect of zinc deficiency on the transpiration of apple seedlings[J]. Acta Agric Univ Pekin, 17(4):74-88. [张福锁，1991. 缺锌对苹果苗蒸腾作用的影响[J]. 北京农业大学学报，17(4):74-88.]

ZENG J, LUO HJ, 2003. Research progress of trace element selenium [J]. Stud Trace Elements Health, 20(2): 52-56. [曾静，罗海吉，2003. 微量元素硒的研究进展[J]. 微量元素与健康研究，20(2): 52-56.]

ZHANG LH, SHI WM, WANG XC, 2006. Effect of different factors on plant uptake of selenite of excised rice roots[J]. Soils, 38(4):417-421.[张联合，施卫明，王校常，2006. 不同因素对水稻离体根吸收四价硒影响[J]. 土壤，38(4):417-421.]

ZENG QL, YU T, WANG R, 2018. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi，Hubei[J]. Geoscience, 32(1): 105-112. [曾庆良，余涛，王锐，2018. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究—以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质，32(1):105-112.]

ZHOU XB, LAI F, ZHANG CM, et al, 2017. Pathways of selenium to grain relative to form of selenium and variety of rice（*Oryza sativa* L.）[J]. Acta Pedol Sin, 54(5):1251-1258. [周鑫斌，赖凡，张城铭，等，2017. 不同形态硒向水稻籽粒转运途径及品种差异[J]. 土壤学报，54(5): 1251-1258.]